

Algoritmo generador de datos básicos aplicado al diseño de un horno productor de frita

Claudia Iliana García Álvarez, Carlos Martínez Chitoy*

La disposición de residuos sólidos es un problema creciente en cualquier país industrial. Durante años, los residuos más peligrosos han sido confinados para evitar un impacto ambiental adverso. Actualmente hay tal cantidad de residuos que ya no es una opción, y se deben investigar otros medios de disponer de ellos sin contaminar ni el suelo ni la atmósfera, ni los mantos acuíferos y, si es el caso, de una manera económicamente eficiente. En un contexto de prevención, valorización y eliminación de desechos residuales, el tratamiento térmico continúa ocupando un lugar prioritario, a falta de otros procesos viables bajo las condiciones técnicas y económicas del momento.¹ Dejando de lado la extracción ulterior de la parte valorizable se hace hincapié en la reducción de su carácter contaminante o peligroso. Los desechos tratados por el método aquí expuesto son esencialmente sólidos, minerales con un potencial contaminante de metales pesados móviles, que se caracterizan por ser poco reactivos, poco evolutivos y poco solubles. Por ejemplo, algunos países poseen industrias hidrometalúrgicas de zinc con muy alta capacidad de producción, generando muchas toneladas de desechos, principalmente en forma de fangos rojos. Este tipo de residuos son difíciles de separar y aislar para reciclarlos y tienen un alto costo de almacenaje, debido a su elevada producción. Por su alto contenido en hierro, zinc y plomo ha sido posible formular vidrios típicos y nuevos por la combinación de residuos urbanos con industriales y minerales. Esto está relacionado con la estabilización por solidificación, fijación química, fijación física o encapsulado.

Son conocidas algunas tecnologías para la valorización y reciclaje de desechos minerales e industriales², con las cuales se procesan fritas vítreas para obtener vitrocerámicas, en las cuales se verifica la presencia de los metales provenientes de los residuos usados como materia prima. Así es como se han producido vidrios originales a partir de desechos de granito, jarosita y cullet de vidrio a 1,450°C, entre otros procedimientos para obtener vitrocerámicos basados en la formulación de materias primas y residuos.³

La ingeniería de los hornos donde se realiza la vitrificación es especialmente dependiente de la materia prima, por las características térmicas resultantes de combinar diferentes materiales.⁴ A continuación se presenta un algoritmo que toma en cuenta sus propiedades clave y que al ser implementado en un lenguaje de cómputo, como el Fortran, permite su ulterior empleo, tanto para el diseño del horno como para incluirlo en un modelo para fines del control de la energía empleada en la fusión de los materiales.

Parámetros de diseño del horno

El diseño de los hornos requiere considerar una diversidad de factores que especifiquen sus dimensiones y materiales de construcción, siendo importantes la temperatura de operación y el tipo de materia prima. El horno más apropiado para fines de una vitrificación industrial es el tipo tanque para una operación por lotes, puesto que debe aceptar flexiblemente diferentes materiales como materia prima.

El diseño de un horno, sea piloto o productivo, sigue dos etapas fundamentales: (a) La ingeniería

El presente artículo está basado en la investigación "Control de la dosificación de la energía de fusión durante la vitrificación de desechos", apoyada por PAICYT CA397-00.

* Facultad de Ciencias Químicas, UANL.

conceptual o proyecto tecnológico y (b) la ingeniería de detalle o proyecto técnico. Siguiendo el procedimiento de ingeniería conceptual, llegamos a establecer los pasos (o algoritmo) que configuran los parámetros básicos del horno:

- Selección del producto: Caracterización, química, física y mineralógica.
- Estimación de las condiciones de la fusión térmica.
- Selección de la materia prima empleando una base de datos.

Selección del producto para el proceso térmico.

El primer paso del algoritmo es seleccionar el producto que se obtendrá. Se requerirá su caracterización en términos mineralógicos, químicos y físicos. Este paso del algoritmo se implementa con una base de datos cuya información es procesada antes de enviarla al programa principal. Considerando que la meta de producción es obtener una vitrocerámica, se emplea en este estudio la especificación de una baldosa cerámica tipo porcelana blanca (porcellanato) maquinada en húmedo y comprimida en seco.

La caracterización mineralógica y química de la baldosa tipo porcelana blanca se muestra en la tabla 1, donde se incluyen los parámetros más significativos que son influidos por el tratamiento térmico al que se va a someter,⁵ i.e. (a) La curva de distribución acumulativa de tamaño de partícula o análisis granulométrico resultante de un ciclo de molido en húmedo, (b) La curva de expansión térmica y su consecuente coeficiente de expansión térmica, (c) el análisis térmico diferencial (DTA, siglas en inglés) y la curva termogravimétrica cuyo patrón hace evidentes las temperaturas más importantes de la composición en la que ocurren los cambios químicos y mineralógicos durante el tratamiento térmico, y (d) las pruebas de calentamiento microscópico para fracciones gruesas y finas, que registran las principales temperaturas -el punto de inicio de encogimiento, puntos de esfera y semiesfera- lo que proporciona las tres temperaturas necesarias para modelar la viscosidad respecto a la temperatura.

La caracterización física. Además de las características físicas mencionadas —granulometría, la curva del DTA, la termogravimetría y de calentamiento microscópico— se incluye: (a) el contenido inicial de humedad (agua física o mecánica) de la materia prima, que influye en la selección del proceso preli-

minar, particularmente de la fase de secado previo antes de homogenizar y mezclar los componentes del lote, (b) La dureza (escala Mohs) u otros índices similares, en el caso de materia prima seca, para prever la sección de quebrado o molido adicional y (c) la forma geométrica, tamaño y dimensiones de la materia prima disponible. Estas propiedades permiten enfocar no sólo la tecnología de pretratamiento, sino el transporte y almacenaje intermedio.

Estimación de las condiciones de la fusión térmica.

Hay diferentes tecnologías térmicas aplicadas a diferentes materiales, la fase de fusión es común a todas. Se hizo una comparación tecnológica de las principales características que afectan el proceso de fusión, y en cada caso se requiere de la viscosidad como función de la temperatura para predecir, con alguna precisión razonable, el intervalo de temperaturas en el que operará el horno de fusión y de si el fundido tiene que ser simplemente descargado y/o enfriado rápidamente en agua (producción de frita granulada).

La forma más común para ajustar la curva de viscosidad versus temperatura del tipo de materiales vitrocerámico es mediante la ecuación Vogel-Fulcher-Tamman (ec.1).

$$\log \mu = A + \frac{B}{T - T_0} \quad (1)$$

donde μ es la viscosidad en poises, $T[^\circ\text{C}]$ es la temperatura, A , B , T_0 son las constantes obtenidas por ajuste algebraico (ec.2).

$$\begin{aligned} A &= \log \mu_1 - \frac{B}{T_1 - T_0} \\ B &= \frac{(T_1 - T_0)(T_2 - T_0)}{T_2 - T_1} (\log \mu_1 - \log \mu_2) \\ T_0 &= \frac{T_2(T_3 - T_1)(\log \mu_1 - \log \mu_2) - T_3(T_2 - T_1)(\log \mu_1 - \log \mu_3)}{(T_3 - T_1)(\log \mu_1 - \log \mu_2) - (T_2 - T_1)(\log \mu_1 - \log \mu_3)} \end{aligned} \quad (2)$$

donde T_1 , T_2 , T_3 son los tres puntos característicos de la viscosidad correspondiente al punto de transformación dilatométrica, el punto de ablandamiento dilatométrico y el punto de semiesfera, del patrón de calentamiento microscópico.

En los anteriores puntos de temperatura los valores correspondientes de $\log \mu$ son iguales para casi todas las composiciones de vitrocerámicos, es decir, 13.00, 10.25, y 4.55. Aun más, se ha establecido experimentalmente que el intervalo útil de

viscosidad en el quemado de vitrocerámicos en baldosas de pared y piso es $\log \mu = 2.5 \div 4$, siendo el menor el que expresa una condición muy fluida (sobre quemado) y el alto, demasiado mate (pobremente madurado).

En caso de que no se produzca una frita granulada, e.g. vidrio, los puntos de temperatura más importantes son:⁴

- Temperatura final de trabajo o punto de recocido (la mínima temperatura para manejar mecánicamente el vidrio), donde $\log \mu = 13$.

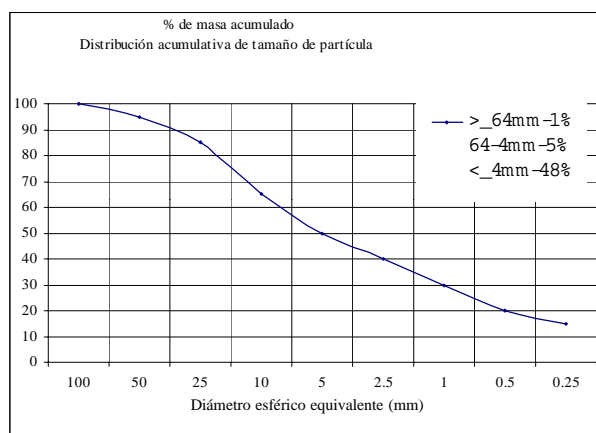
- Temperatura mínima de salida o punto de ablandamiento de Littleton, donde $\log \mu = 7.65$.

- Temperatura máxima de salida o la máxima temperatura para manejar mecánicamente el vidrio, donde $\log \mu = 4$.

- Temperatura de maduración del vidriado (en inglés "glazes") y/o vitrificado, para seleccionar el tipo de refractario en la punta de descarga del horno, donde $\log \mu = 3$.

- Temperatura de Fusión (FT) (calculada según Lengersdorff) o valor mínimo para operar el tanque de fusión, también es importante para seleccionar los refractarios y el medio de calentamiento, donde $\log \mu = 2$.

Adicionalmente, a partir de esta información se obtienen otros parámetros de interés como el Índice del Intervalo de Trabajo, el Intervalo de Trabajo y la Velocidad Relativa de Maquinado.



PRUEBA DE CALENTAMIENTO MICROSCÓPICO

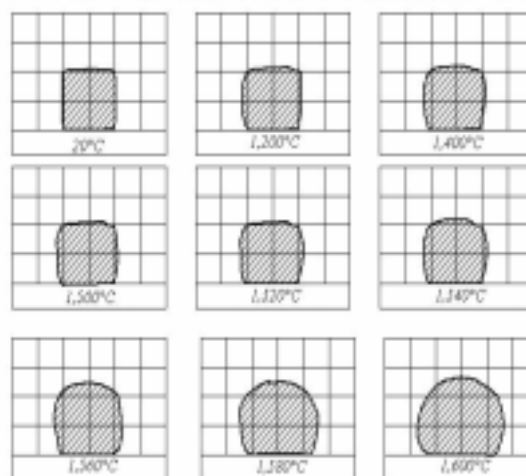
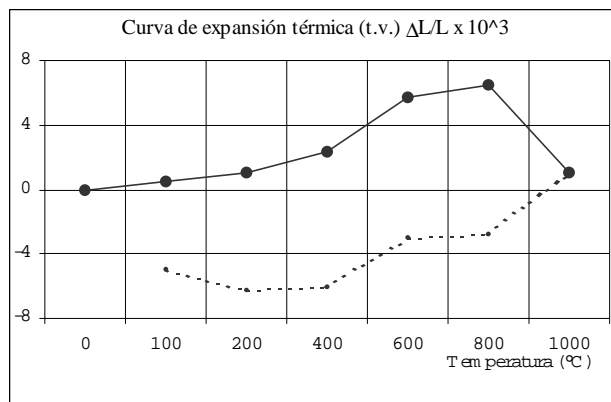


Tabla I. Especificaciones mineralógico-químicas de Baldosa (Stoneware) tipo porcelana blanca (porcellanatto) maquinada en húmedo y comprimida en seco (wet milled – dry pressed)

Composición química			Composición mineralógica		
	t.v.*	$\leq 4\mu m$		t.v.	$\leq 4\mu m$
P. I.**	3.94	8.43	Cuarzo	31	14
SiO ₂	69.89	55.61	Feldespato-Na	32	12
Al ₂ O ₃	18.41	29.06	Feldespato-K	4	1
TiO ₂	0.70	1.09	Caolinita	20	52
Fe ₂ O ₃	0.34	1.28	Ilita-muscovita	9	16
MgO	0.66	0.6	Corita	2	3
CaO	0.77	0.25			
Na ₂ O	3.73	1.4			
K ₂ O	1.56	2.22	Accesorios	2	2

* t.v. (a granel). ** P.I. Pérdidas por ignición



Selección de materia prima. Existen actualmente resultados de numerosos análisis de los productos de la fusión de residuos provenientes de diversos incineradores, ya sea de basura o de mezclas de cenizas diversas.⁶ Estos resultados son los que constituyen precisamente la base de datos del algoritmo.

Al estar interesados en producir vitrocerámicos u objetos vitrificados, particularmente baldosas para pared y piso, es inevitable tener una base inicial de la caracterización preliminar de los componentes, y el criterio de compatibilidad para su eventual empleo con materia prima adicional, i.e., residuos peligrosos, así, por ejemplo, para introducir Li_2O se utiliza petalia natural o espodumena. Otras materias primas naturales incluyen rocas como basalto, toba y granito. Los residuos industriales como escorias metalúrgicas (40-70% de escoria) y las cenizas volantes de las calderas se utilizan por su alto contenido en TiO_2 , las mismas escorias son modificadas con arena, arcilla y sulfatos.

El algoritmo desarrollado compara las vitrocerámicas en su gran variedad (transparente, brillante, mate, opacificado, etc.) utilizando la composición de óxidos convertida en la conocida fórmula molecular, donde la suma de los equivalentes moleculares de óxidos básicos se hacen referencia a la unidad como base para la comparación (Seger). Esta sección del algoritmo está constituida por un conjunto de instrucciones heurísticas procesadas bajo un esquema de minimización, que es la combinación de programación dinámica y "Búsqueda ordenada" (Ordered Branch Search).⁷

Una parte importante del algoritmo son las subrutinas que calculan unas cuantas propiedades fundamentales de los óxidos, mediante la combinación aditiva de los parámetros experimentales y la composición de cada óxido.⁸ Además del Coeficiente

de Expansión Volumétrica 3α (Winkelman y Schott, Mayers y Havas e English y Turner) y del Coeficiente de Tensión Superficial $\sigma_{900^\circ\text{C}}$ (Dietzel) los parámetros calculados son: el índice Thorpe (TI) (ec.3) que es utilizado cuando la vitrocerámica se emplea en mesas cerámicas o la producción de material de estufas.

$$TI = \frac{\text{Equivalente fórmula (básico + neutro)} \cdot 223.1}{\text{Equivalente fórmula ácido} \cdot 60} \quad (3)$$

y el índice de Razón de acidez (RA) (ec.4), que está definido por el cociente de valencias ácidas a básicas, obtenida de la fórmula química $1\text{RO}, x\text{R}_2\text{O}_3, \text{RO}_2$ fórmula que proporciona una evaluación preliminar de la estabilidad del vidrio o del vitrocerámico ante sustancias ácidas o alcalinas.

El mejor intervalo del índice Thorpe ($TI=1.5$ a 2) asegura que el vitrocerámico sea satisfactoriamente seguro contra la transferencia de plomo hacia contactos externos, por la baja solubilidad del plomo en los vitrocerámicos. Según Seger⁸ los materiales vitrocerámicos con un $RA < 1.5$ (básicos) pueden ser manchados por ácidos, y los de $RA > 3$ (ácidos) pueden ser inestables bajo la acción de agentes básicos [Cisi, 1998]. Otras de las reglas heurísticas contenidas en el algoritmo son las siguientes:

- Los componentes minerales de carbonato representan un agente químico peligroso, particularmente si se acompaña de otros materiales de bajo punto de fusión con un porcentaje de óxidos superior al 10%. Su efecto en la estructura de sílica-alúmina de la mullita sintética, que se emplea para construir las paredes y bóveda de los hornos de fusión, es causar una profunda corrosión.

- Los minerales alcalinos y alcalinotérreos deben limitarse, por sus propiedades de formar óxidos de bajo punto de fusión en combinación con la sílica y alúmina de los refractarios. La formación de depósitos de componentes de bajo punto de fusión se favorece con las altas temperaturas, incrementando la acción destructiva en los refractarios. La experiencia recomienda no exceder el 10% de óxidos alcalinos para tener una vida útil conveniente de la estructura refractaria de mullita.

Un resultado ilustrativo del algoritmo se muestra en la tabla II, donde se muestran los valores de la composición y parámetros de interés que correspon-

den a: (a) un residuo peligroso de frita $\text{Ca-Pb-B}_2\text{O}_3$, como parte de la materia prima y (b) el producto, que es una vitrocerámica opacificada de zirconia.

En este ejemplo, el residuo mencionado tiene un contenido de $\text{CaO} = 33.52\%$, el cual es no aceptable y se debe asumir como peligrosa para las uniones de mullita sintética entre refractarios del horno. El contenido $\text{Li} + \text{Na} + \text{K} = 0 + 4.2 + 0.891.31 < 10\%$ de alcalinos es aceptable, el de alcalinotérreos $\text{Ca} + \text{Mg} + \text{Ba} = 33.52 + 0.61 + 0.16 = 34.29$ es no aceptable, el índice Thorpe $T.I. = 3.1671$ es no aceptable, y la temperatura de quemado, $F.T. = 859.9^\circ\text{C}$ es no aceptable. Una vez combinado con otros materiales sugeridos por el algoritmo, el producto presenta un intervalo de temperatura de maduración de 1120 - 1130°C aceptable, un índice Thorpe $T.I. = 1.79$ cercano al límite de seguridad, pero con composición aceptable, y una razón de acidez $R.A. = 1.92$, que se clasifica como estable.

Alternativas de equipo de fusión. Las unidades de horno rotatorio son las más empleadas con éxito en manufacturas continuas. Sin embargo, se excluyen por dos razones principales: (a) el material tratado en la fusión sólo puede emplearse por lotes y (b) debido a la máxima temperatura de operación ($\leq 1400^\circ\text{C}$), sin considerar la baja eficiencia en la transmisión de energía térmica al lote en comparación con otras unidades. La unidad de fusión tipo tanque representa, aún en unidades pequeñas, el mejor compromiso entre flexibilidad de operación (diferentes lotes) y la eficiencia térmica y nivel de temperatura de operación (hasta 1450°C). La ingeniería completa debe incluir las siguientes fases:

1. Pretratamiento y almacenamiento de materia prima.
2. Homogenización y preparación de lotes.

$$RA = \frac{2 \text{ Equiv. fórmula } \text{SiO}_2 + 6 \text{ Equiv. fórmula } \text{B}_2\text{O}_3 + 4 \sum \text{Otros Equiv. fórmula ácidos } \text{RO}_2}{2 + 6 \sum \text{Equiv. fórmula básicos}}$$

Diseño conceptual del horno

Tabla II. Ilustración de los resultados arrojados por el algoritmo. (a) Material de residuo de una frita de $\text{Ca-Pb-B}_2\text{O}_3$, (b) Producto porcelanatto opacificado con Zr.

(a) $RA = 1.5776$, $TI = 3.1671$, $FT = 859.9^\circ\text{C}$, $\sigma_{900^\circ\text{C}} = 351.748$, $3\alpha = 262.225$

PF	29.88	223.2	61.99	94.19	56.08	40.32	153.4	81.38	159.7	101.9	69.64	60.06	79.9	123.22	150.7
	Li_2O	PbO	Na_2O	K_2O	CaO	MgO	BaO	ZnO	Fe_2O_3	Al_2O_3	B_2O_3	SiO_2	TiO_2	ZrO_2	SnO_2
3α	2	3	10	8.5	5	0.1	3	1.8	4	5	0.1	0.3	4.1	2.1	2
σ	4.6	1.2	1.5	0.1	4.8	6.6	3.7	4.7	4.5	6.2	0.8	3.4	3	4.1	3.5
$\Sigma 100\%$	d	8.95	0.42	0.89	33.52	0.61	0.16	d	0.14	1.57	9.18	36.55	0.04	7.97	d
Fórmula empírica $\times 10^{-2}$:	d	5.98	1.01	1.41	89.18	2.26	0.16	d	0.13	2.3	19.67	90.80	0.07	9.05	d
					1.000				0.0243				1.202		

Nota: los valores de composición demasiado pequeños para figurar en la fórmula se denotan con "d".

(b) $RA = 1.92$, $TI = 1.79$, $FT = 1129^\circ\text{C}$, $\sigma_{900^\circ\text{C}} = 377.4$, $3\alpha = 197.77$

PF	29.88	223.2	61.99	94.19	56.08	40.32	153.4	81.38	159.7	101.9	69.64	60.06	79.9	123.22	150.7
	Li_2O	PbO	Na_2O	K_2O	CaO	MgO	BaO	ZnO	Fe_2O_3	Al_2O_3	B_2O_3	SiO_2	TiO_2	ZrO_2	SnO_2
3α	2	3	10	8.5	5	0.1	3	1.8	4	5	0.1	0.3	4.1	2.1	2
σ	4.6	1.2	1.5	0.1	4.8	6.6	3.7	4.7	4.5	6.2	0.8	3.4	3	4.1	3.5
$\Sigma 100\%$	d	1.18	0.98	3.13	9.08	2.10	d	11.67	0.1	6.64	3.97	53.82	0.09	7.24	d
Fórmula empírica $\times 10^{-2}$:	d	6.32	3.76	7.89	38.46	12.37	d	29.2	0.15	15.47	13.54	212.9	0.27	13.96	d
					1.000				0.1562				2.406		

Nota: los valores de composición demasiado pequeños para figurar en la fórmula se denotan con "d".

3. Transporte, almacén intermedio, alimentación y extracción.
4. Fusión en el horno y descarga.
5. Recolección del producto final (enfriamiento, empaque, almacén, etc).
6. Protección ambiental contra sólidos y componentes peligrosos transportados hacia el ambiente.

Tecnología periférica de producción. La generalidad de las aplicaciones de fusión siguen una tecnología de producción típica, que incluye la preparación de la materia prima y las operaciones de separación de polvos de los gases resultantes, donde se resalta la recuperación y reutilización de la energía en un intercambiador de calor gas-gas de diseño especial. Para ello, el algoritmo arroja resultados que serán utilizados en el cálculo del cambiador de calor correspondiente.

Se espera que el horno opere bajo condiciones severas (régimen intermitente, composiciones variables) y esto implica una cuidadosa operación dentro de ciertos límites. Se incluyeron en las reglas heurísticas una serie de límites prácticos, por ejemplo, considerar una temperatura máxima de 1,450°C y un quemador principal de alta velocidad, puesto que la forma más eficiente de transferir calor a la carga de material (sin exceder la temperatura máxima) en la cámara del horno, es tener una flama máxima axial y enviar rápidamente los productos de la combustión a la salida, suponiendo que la temperatura teórica de la flama no exceda, en condiciones estacionarias, más de 250°C la máxima temperatura de operación.³ Otros límites están contenidos tanto en los combustibles como en la materia prima, y de la generación de dióxido de carbono de la materia prima (carbonatos, caliza, dolomita, etc.) que forman parte de la composición de los gases de salida. El algoritmo analiza la información relacionada con la materia prima y la fuente de energía, terminando por presentar un balance térmico y de masa. El primero de ellos es dependiente de la temperatura más apropiada para la operación que resulta del cálculo de la relación aire a combustible, con la curva de temperatura de la flama y del aire precalentado.

Los resultados que arroja el programa son suficientes para especificar la ingeniería de detalle, i.e. las dimensiones de la cámara de combustión, el espesor de la pared refractaria, las dimensiones del acceso de gas y aire, y la información necesaria para

Tabla III. Resultados del algoritmo para el procesamiento de una materia prima compuesta principalmente por lodo rojo

(a) Proporción (%) en peso) de los materiales que constituyen la materia prima (sin las pérdidas por ignición):

Lodo rojo típico de residuos mineros de S.L.P.	31.47
Residuos de granito	34.19
Arena sílica	24.05
Caliza	5.76
Soda calcinada (seca)	4.53
	100.00
Pérdidas por ignición	15.12

(% en peso de la materia prima original)

(b) Flujos máxicos: base 1000 Kg/ 24 hrs de frita de cerámica.

	Kg/hr	
Materia Prima	50.00	(47.97 + 2.03 polvo)
Gas combustible	22.92	
Aire de comburent	411.25	
(20°C)		
Aire de enfriamiento	3019.6	
(20°C)	2	
Frita fundida	41.67	
Polvo arrastrado por gases	2.03	
Gases (aire y productos)	3460.0	(3453.79 + 6.3 generado por la frita)
	9	

(c) Temperaturas:

	°C		°C
Frita	1200.00	Gases de combustión	150.00
Horno	1450.00	Gases filtrados	120.00
Aire precalentado	396.00	Agua de enfriamiento	938.00
Aire ambiente	20.00		

(d) Balance térmico:

	KW		KW
Potencia de la combustión	290.70	Calor de transformación de la materia prima	20.23
Materia prima	2.30	Calor eliminado a la frita por enfriamiento	16.16
Aire precalentado	44.18	Gases diluidos sucios con polvos	283.6
Aire no precalentado	0.28	Pérdidas al ambiente y capac. cal. horno (5%)	16.87

(e) Requerimientos de intercambio de calor para el aire precalentado (recuperador)

Temperatura	°C		
de frita	1200.00	Potencia calorífica	37992.36 Kcal
de gases de combustión	937.80	flujo de calor por °C	46.348 Kcal/hr.°C
de aire frío	20.00	Área esperada	4.756 m ²
de aire precalentado	396.30	Coefficiente global de interc. teórico	9.745 Kcal/hr.°C m ²
ΔT media logarítmica	819.72		

(f) Gases de combustión temperatura ambiente= 20°C.

Cp aire	$0.2403 + 0.0427 \times 10^{-3} T$ (0-1000°C)
Cp gases	$0.2546 + 0.0716 \times 10^{-3} T$
Razón de gas frío / gas caliente (prueba y error)	6.824
Temperatura caliente de gases	938.00 °C
Temperatura fría de gases diluidos	150.00 °C

(g) Aire de combustión

Gas LPG compos. en volumen 0.9999 C ₃ H ₈ , 0.0001 CH ₄ , donde X ₁ (C ₃ H ₈)= 0.3995, X ₂ (C ₃ H ₈)= 0.6004			
Aire teórico		28.109 Nm ³ /Nm ³	
LPG masa		2.34 Kg	
Estimación del exceso de aire, α = 1.2			
CO ₂	3.6019	Nm ³ /Nm ³	7.0713
H ₂ O	4.6019		3.6963
SO ₂	-		-
N ₂	26.6472		33.4038
O ₂	1.1806		1.6876
	36.0315		45.8502
Densidad		1.2728 Kg/Nm ³ gas	
Cp		0.2546	
Temperatura teórica de flama		1884 °C	
Kg gases/ Kg LPG =		45.8592 / 2.34=	19.5979

ria prima para la producción de productos comerciales. Los equipos diseñados para ello se han mejorado poco a poco, incorporando cada vez diseños más inteligentes. La combinación de los materiales empleados como materia prima también debe realizarse en forma inteligente.

El algoritmo estudiado es apto para ser trasladado a un sistema de control moderno que adapte el proceso de fusión a una gran variedad y variación en la composición de la materia prima, sin alejarse mucho de un procesamiento energéticamente económico.

Resumen

Bajo la consideración de tomar una alternativa más eficiente para disponer de residuos sólidos peligrosos, se estudia la manera de desarrollar un algoritmo que posibilite el diseño de un horno y la modelación matemática del proceso de fusión en el mismo. El algoritmo debe admitir la entrada de datos concernientes a la materia prima tales como el análisis granulométrico, la curva de expansión tér-

(h) Fórmula empírica de la materia prima (= producto), y parámetros de diseño.

$$RA = 0.9224, TT = 2.34, FT = 1,172.68^{\circ}\text{C}, \sigma_{\text{max}} = 380.78, 3\alpha = 281.56 \times 10^{-7} \text{ CaO aceptable}$$

PF	29.88	223.2	61.99	94.19	56.08	40.32	153.4	81.38	159.7	101.9	69.64	60.06	79.9	123.22	150.7
	Li ₂ O	PbO	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	MgO	BaO	ZnO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	B ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	ZrO ₂	SnO ₂
3α	2	3	10	8.5	5	0.1	3	1.8	4	5	0.1	0.3	4.1	2.1	2
σ	4.6	1.2	1.5	0.1	4.8	6.6	3.7	4.7	4.5	6.2	0.8	3.4	3	4.1	3.5
Σ100%	d	0.629	5.838	2.187	7.629	0.879	d	4.996	30.7728	6.313	d	50.72	0.007	d	d
Fórmula empírica x10 ⁻³	d	0.83	27.81	6.83	40.04	6.42	d	18.07	38.28	18.23	d	248.6	0.03	d	d
					1.000				0.5651				2.486		

Nota: los valores de composición demasiado pequeños para figurar en la fórmula se denotan con "d".

determinar los intercambios de calor periféricos como el recuperador de energía de los gases y la cantidad de enfriamiento del producto. La tabla 3 despliega resúmenes de los cálculos más relevantes realizados por el algoritmo para una materia prima compuesta principalmente por un lodo rojo de residuos mineros.

Conclusión

Los cambios en las regulaciones ambientales y la atención mundial, por tener un ambiente más limpio y saludable han favorecido el desarrollo de procesos que utilizan residuos industriales como mate-

rica diferencial y la composición química y mineralógica, para con ello determinar indirectamente la cantidad de energía necesaria para su fusión y formación de frita, e.g. vitrocerámica. El algoritmo se implementa en un lenguaje computacional compatible con programas de simulación.

Palabras clave. Diseño de horno, Algoritmo, Vitrocerámica, Frita, Desechos.

Abstract

In the consideration of taking an efficient alternative to dispose of hazardous solid residues, we studied

the way of developing an algorithm that makes possible the design of an incineration kiln and the mathematical model of fusion during the process. The algorithm must admit the data entry concerning the raw material, such as the granulometric analysis data, differential thermal analysis data and the raw material's chemistry and mineralogical composition. These data are needed in order to determine indirectly the quantity of the energy necessary for their fusion and frit build up, e.g. ceramic glazes. The algorithm is developed in a computational language compatible with simulation programs.

Keywords. Kiln design, Algorithm, Ceramic glasses, Frit, Wastes.

Referencias

1. Mergler, R. *Vitrification des Résidus Suivant Le Procédé Solur*. Lurgi Energie und Umwelt, GmbH, Allemagne. *Procédés de Solidification et de stabilisation des déchets*. pp.519-527. 1995.
2. Rincón, J. Ma., Romero, M. *Glass Ceramics as Building Materials*. *Materiales de construcción*, (España), 5-6, pp.91-94. 1996.
3. Vehlow, J. *Thermal Treatment of Municipal Solid Wastes. Part I: Actual Status of Waste Combustion in Grate Systems*. International Training Course on Technologies for the Valorization and Recycling of Mineral and Industrial Wastes. Ente Minerario Sardo, Iglesias, Italy, 30 nov. 11 dec. 1998.
4. Cisi, Gaetano. *Technological Aspects of a Vitrification Pilot Plant for Recycling Industrial Wastes Into Glasses*. Conferencia presentada en el "International 1st Training Course", ICS (UNIDO), Iglesias, Cerdeña, Italia, 1998.
5. Valentini, G., Santoro, L. *Valorizzazione di sottoprodotti e residui solidi di origine industriale*. *Acqua Aria*, 6, 747-753, 1988.
6. Worral, W.E., *Clays and Ceramic Raw Materials*, 2nd edition, Elsevier Applied Science Publishers, London, UK, 1986.
7. Rodrigo, F.R., Seader, J.D. *Synthesis of Separation Sequences by Ordered Branch Search*. *AIChE Journal* Vol.21 No. 5, pp.885-894, 1975.
8. Reed, J.S., *Principles of Ceramics Processing*, 2nd edition, J. Wiley and Sons, N.Y., 1995.